

## (مدل سازی سه بعدی پیل سوختی PEM و تاثیر پارامترهای هندسی در عملکرد آن)

سیده طوبی رئیس زاده ضیابری<sup>۱\*</sup>، سیامک حسین پور<sup>۲</sup>

تبریز - شهر جدید سهند - دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی سهند

([shohrehraizadeh@yahoo.com](mailto:shohrehraizadeh@yahoo.com)\*)

### چکیده

امروزه مطالعات گسترده ای در زمینه توسعه پیل های سوختی و تاثیر پارامترهای مختلف در عملکرد آنها صورت گرفته است. یکی از این مطالعات تغییر هندسه کانال جریان است که با تغییر میزان نفوذ گازهای واکنش دهنده و نیز سرعت آنها، عملکرد پیل را تحت تاثیر قرار می دهد. در مقاله ی حاضر هم به مدل سازی سه بعدی پیل سوختی PEM با استفاده از نرم افزار Fluent 6.3.2 پرداخته شده و تاثیر پارامترهای هندسی در میزان دانسیته ی جریان گرفته شده از پیل و کارایی آن بررسی شده است. مشاهده شده که با کاهش شیب دار ارتفاع کانال جریان در طول پیل سوختی میزان نفوذ گازهای واکنش دهنده افزایش یافته و دانسیته ی جریان بیشتری از پیل گرفته می شود.

واژه های کلیدی: پیل سوختی - هیدروژن - منحنی پولاریزاسیون - دانسیته ی جریان

### ۱- مقدمه

با توجه به مشکلات استفاده از سوخت های فسیلی از قبیل آلودگی هوا، گرم شدن کره ی زمین، محدودیت این منابع و رشد جمعیت کره ی زمین که منجر به افزایش استفاده از منابع انرژی می شوند، استفاده از سوخت های با آلودگی کمتر و نیز تجدیدپذیر در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. یکی از انواع این منابع، پیل های سوختی هستند که انرژی حاصل از انجام واکنش های شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می کنند. از بین آنها، پیل سوختی با سوخت هیدروژن (PEM) به دلیل دمای عملکردی نسبتاً پایین و نیز بازدهی نسبتاً خوب آن از اهمیت ویژه ای برخوردار است. استفاده از سوخت های فسیلی که ۸۰ درصد نیاز انرژی ما را تأمین می کنند، دارای دو مشکل اساسی می باشند. اولین مشکل محدود بودن منابع و تمام شدنشان در آینده نزدیک است. بنا به تخمین شرکت های نفتی، بنزین و گاز طبیعی که از لحاظ بهره برداری مناسب ترین محصولات سوخت های فسیلی هستند، در فاصله زمانی بین سالهای ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی به اوج مصرف خود خواهند رسید و پس از آن به دلیل محدودیت منابع، یک شکاف بزرگ بین عرضه و تقاضای انرژی در دنیا بوجود خواهد آمد [1].

دومین مشکل استفاده از سوخت های فسیلی، بوجود آمدن مشکلات مهم زیست محیطی مانند افزایش گرمای زمین، تغییرات آب و هوایی، ذوب شدن یخ های قطبی، افزایش سطح آب دریاها، باران های اسیدی، آلودگی هوا، از بین رفتن لایه اوزون و... می باشد که تخمین ها نشان می دهند خسارات زیست محیطی وارد بر کل زمین در هر سال از مرز ۵ تریلیون دلار عبور کرده

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند

است. برای حل این دو مشکل اساسی، در سال ۱۹۷۰ میلادی سیستم‌های با انرژی هیدروژن پیشنهاد شدند که در طی قرن اخیر تحقیقات زیادی بر روی آنها انجام شده است. هیدروژن به عنوان بهترین حامل انرژی دارای ویژگی‌های منحصر به فردی همچون بازدهی بالا و نداشتن آلودگی برای محیط زیست می‌باشد. از دیگر ویژگی‌های منحصر به فرد هیدروژن این است که می‌تواند در طی یک فرآیند الکتروشیمیایی در داخل پیل سوختی، جریان الکتروسیسته تولید کند که بازده آن در مقایسه با تبدیل سوخت فسیلی به انرژی الکتریکی در یک موتور احتراق داخلی یا به انرژی برق در یک نیروگاه، بیشتر است [2]. این ویژگی باعث شده است که شرکت‌های ماشین‌سازی پیل‌های سوختی هیدروژنی را به عنوان اصلی‌ترین گزینه برای نیروی محرک اتومبیل‌های آینده انتخاب کنند. پیل‌های سوختی در واقع مبدل‌های الکتروشیمیایی هستند نه موتورهای گرمایی، به همین دلیل از سیکل کارنو که محدودیت‌هایی مخصوصاً از جنبه‌ی بازده دارد، تبعیت نمی‌کنند [2]. بنابراین انتظار می‌رود در طی قرن اخیر پیل‌های سوختی با موتورهای گرمایی (موتورهای احتراق داخلی، توربین‌های بخار و توربین‌های گازی) و هیدروژن با سوخت‌های فسیلی جایگزین گردند.

مطالعات گسترده‌ای در رابطه با پیل سوختی و تاثیر پارامترهای مختلف در نحوه‌ی عملکرد پیل به صورت آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته که به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود. در سال ۱۹۹۲ برناردی و وبرنگ [3] به مدل‌سازی تک‌بعدی، هم‌دما و تک فاز غشا در پیل سوختی PEM پرداختند. با فرض ایزوتروپیک و همگن بودن غشا و الکتروود نشان دادند که تاثیر ابعاد در ولتاژهای پایین بیشتر است و در ولتاژهای بالاتر اختلاف چندانی را شاهد نیستیم. مدل‌های تک‌بعدی ارائه شده تنها تغییرات غشا را بررسی کرده و قادر به ارائه‌ی نتایج اساسی برای فهم مکانیزم داخلی پیل سوختی نبودند. این مدل‌ها تنها یک چارچوب برای مدل‌سازی چند بعدی پیل‌های سوختی ارائه کردند. فالر و نیومن<sup>۲</sup> شروع به مدل‌سازی دوبعدی کرده و در واقع تغییرات را حول غشا و در جهت حجم جریان بررسی کردند. آقای هی<sup>۳</sup> در تحقیقی که در سال ۲۰۰۰ انجام داد [4]، یک پیل سوختی PEM دوبعدی، هم‌دما و دوفازی را به صورتی که فقط شامل سمت کاتد پیل باشد، شبیه‌سازی کرد به گونه‌ای که لایه‌ی کاتالیستی را به صورت یک لایه‌ی بسیار نازک در نظر گرفت و به این ترتیب جریان در داخل پیل را مورد بررسی قرار داد. وی تاثیر پارامترهای طراحی را نیز مورد توجه قرار داد. نتایج به دست آمده نشان داد که اختلاف فشار بین ورود و خروج کانال گاز<sup>۴</sup> عملکرد الکتروود را بهبود می‌بخشد. سوکی-اوم و وانگ<sup>۵</sup> در سال ۲۰۰۳ [5]، تاثیر هندسه را در مدل تک‌سلولی خود که دارای دو کانال در سمت کاتد و دو کانال آند بود مورد توجه قرار دادند. آن‌ها انتهای کانال را از سمت کاتد مسدود کردند تا تاثیر آن را مطالعه کنند و نشان دادند که جریان اجباری به وجود آمده در داخل پیل به دلیل مسدود بودن انتهای آن، انتقال اکسیژن به طرف لایه‌ی کاتالیستی را افزایش داده و در نهایت منجر به افزایش دانسیته‌ی جریان در داخل پیل می‌شود. به دلیل مشکلات و زمان بر بودن آزمایشات تجربی مطالعه اختلاف طراحی‌های مختلف به صورت عددی انجام شد. ژئون<sup>۶</sup> [6] یک مدل CFD به منظور مشخص کردن میزان دانسیته‌ی جریان در کانال‌های مارپیچ با طراحی‌های مختلف ارائه نمود. وی تلاش خود را روی مشخص کردن توزیع جریان در کانال و قسمت انحنا بین راه‌های مارپیچ متمرکز کرده و آنها نشان داد که میزان دانسیته‌ی جریان در ناحیه‌ی انحنا کمتر از پیچ می‌باشد. در این مواقع حالت بهینه عریض بودن کانال‌ها و باریک بودن انحنا می‌باشد. ونگ و لیو<sup>۷</sup> [7] به بررسی میزان تفاوت دانسیته‌ی جریان در ناحیه‌ی کانال و انحنا در کانال در مارپیچ پرداخته و نشان دادند که دانسیته‌ی جریان در ناحیه‌ی پیچ حتی در ولتاژهای بالاتر بیشتر است. این نتیجه بر خلاف نتایج قبلی است [8]، زیرا نشان می‌دهد کانال‌های عریض با پیچ‌های نزدیک به هم بهتر است. در سال ۲۰۰۹

<sup>1</sup>- Bernardi & Vebrunge

<sup>2</sup>- Fuller & Newman

<sup>3</sup>- He

<sup>4</sup>- Gas chanell

<sup>5</sup>- Sukee & Wang

<sup>6</sup>- Jeon

<sup>7</sup>- Wang & Liu

اندرو هایگر ولیو<sup>1</sup> [9] به مدل سازی سه بعدی پیل سوختی با کانال ماریپیچ پرداخته و اثر تغییر آرایش کانال ماریپیچ را در میزان دانسیته ی جریان و در نتیجه عملکرد پیل بررسی کردند و نشان دادند که هرچه کانال باریک تر بوده و فاصله ی بین کانال ها در پیچ کمتر باشد میزان عملکرد پیل بهتر خواهد بود و دانسیته ی بیشتری خواهیم داشت. بیکاش میشر<sup>2</sup> و جون خیاو<sup>3</sup> در مقاله ای که در سال ۲۰۰۹ دادند [10]، یک مدل سه بعدی را با کانال ماریپیچ شبیه سازی کرده و در آن تاثیر پارامترهای مختلف را در حالت شروع به کار پیل، مورد بررسی قرار دادند. شرایط اولیه ای که برای این مدل در نظر گرفتند به دو صورت بود که در یکی این شرایط با شرایط ورودی کانال یکسان در نظر گرفته می شد یعنی شرایط اولیه تمام نقاط داخل پیل، همان شرایط ورودی در کانال قرار داده می شد و در دیگری شرایط تعادل مورد نظر قرار می گرفت. در این مدل تک فاز بودن یا دو فاز بودن سیستم به منظور فهمیدن تاثیر آب مایع در چگونگی عملکرد پیل و همچنین هم دما بودن و غیر هم دما بودن مدل به منظور فهمیدن اثر دما در این عملکرد مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این ها میزان ضخامت لایه عبور گاز و نیز مقدار تخلخل آن تغییر داده شد و نتایج نشان دادند که این پارامترها در دانسیته ی جریان پیل تاثیر می گذارند. به نظر می رسد که مطالعه ی اثرات هندسی در عملکرد پیل سوختی نیاز به مطالعه و بررسی بیشتری می باشد.

## ۲- معادلات حاکم:

در این مدل سازی، تمام نواحی داخل پیل به صورت یک تک ناحیه<sup>4</sup> و بدون شرایط مرزی داخلی بین نواحی مختلف، در نظر گرفته شده است که به این ترتیب برای حل نواحی مختلف داخل پیل، فقط از یک سری معادلات حاکم استفاده می شود. برای حالتی که پیل، دما ثابت در نظر گرفته می شود، معادلات حاکم به صورت معادلات بقای جرم، مومنتوم، بقای گونه ها و معادله پتانسیل الکتریکی (بقای بار الکتریکی) می باشند و به صورت زیر خواهند بود:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{u} \vec{u}) = -\varepsilon \nabla P + \nabla \cdot (\varepsilon \mu^{eff} \nabla \vec{u}) + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon c_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \vec{u} c_k) = \nabla \cdot (D_k^{eff} \nabla c_k) + S_k \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_{mem}^{eff} \nabla \phi_{mem}) + S_{mem} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_{sol}^{eff} \nabla \phi_{sol}) + S_{sol} = 0 \quad (5)$$

در روابط گفته شده در بالا  $\vec{u}$  بردار سرعت، P فشار،  $C_k$  غلظت گونه k و  $\phi$  پتانسیل الکتریکی می باشد.  $S_u$ ،  $S_k$ ،  $S_{mem}$  و  $S_{sol}$  به ترتیب ترم منبع معادلات مومنتوم، بقای گونه، پتانسیل الکترولیت و پتانسیل بخش جامد می باشد. مقادیر این ترم های منبع در جدول ۱ آورده شده است.

1- Higier & Liu  
2- Bikash & Mishra  
3- Junxiao  
4- Single domain

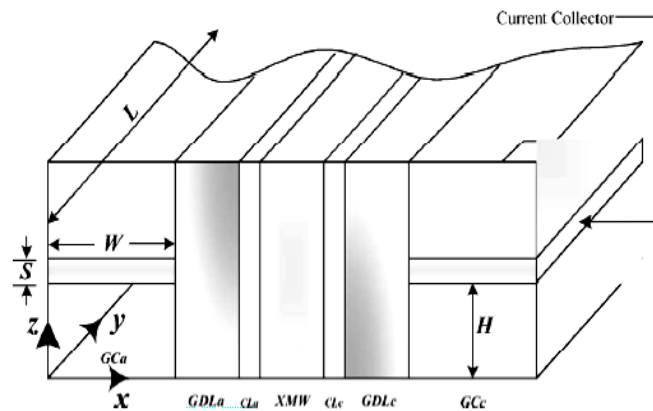
جدول ۱- ترم های منبع در معادلات مومنتوم، بقای ذرات و پتانسیل [5]

	کانال جریان	GDL	Catalyst layers	Membrane
مومنتوم	$S_u = 0$	$S_u = \frac{-\mu}{k} \varepsilon^2 \vec{u}$	$\vec{u} = 0$	$\vec{u} = 0$
بقای ذرات	$S_k = 0$	$S_k = 0$	$S_k = -\nabla \cdot \left( \frac{n_d}{F} I_e \right) - \frac{s_k j}{nF}$	$S_k = -\nabla \cdot \left( \frac{n_d}{F} I_e \right)$
پتانسیل	$S_\phi = 0$	$S_\phi = 0$	$S_\phi = j$	$S_\phi = 0$

جدول خواص الکتروشیمیایی و انتقال اجزا به تفصیل در مرجع [5] آورده شده است.

### ۳- صحت سنجی و استقلال از مش مدل سازی:

برای صحت سنجی مدل سازی، از یک مدل نسبتاً پیچیده تر با دو کانال در سمت آند و دو کانال از سمت کاتد مطابق مرجع [5] استفاده شده. شکل زیر مدل هندسی صحت سنجی شده را نشان می دهد. از ذکر جزئیات مربوط به ابعاد هندسی و شرایط عملکردی خود داری شده است.



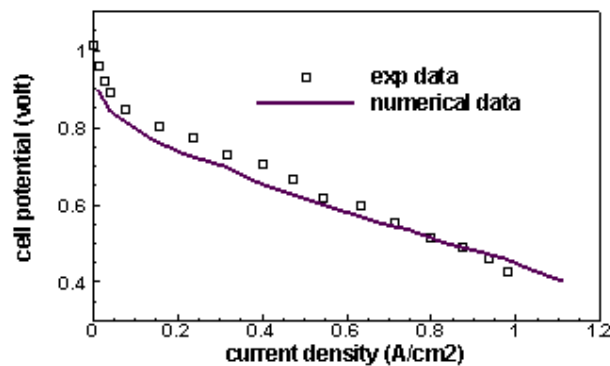
شکل ۱- نمای هندسی پیل سوختی مدل سازی شده

به منظور کسب اطمینان از مستقل بودن حل از اندازه شبکه ایجاد شده، شبکه‌های مختلفی به صورت باسازمان و با سلول‌هایی به شکل مکعب مستطیل هشت وجهی، با اندازه‌های مختلف ایجاد و نتایج حل آنها با هم مقایسه گردید که در نهایت شبکه‌ای با ۲۳۹۰۰۰ گره و انتخاب گردید. همگرایی حل زمانی برقرار می‌شود که خطای نسبی بین دو تکرار متوالی، کمتر از  $10^{-5}$  باشد.

جدول ۲- استقلال از مش مدل هندسی صحت سنجی شده

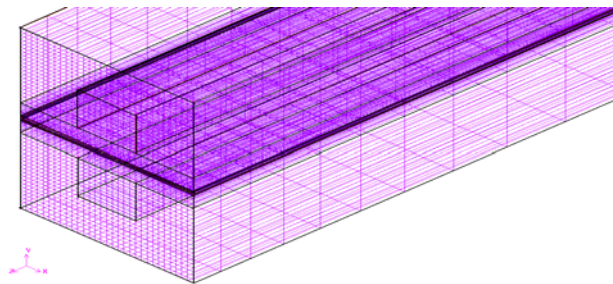
ولتاژ مرجع [v]	دانسیتته جریان بدست آمده [A/cm2]	تعداد گره
۰/۷۵	۰/۱۶	۱۱۲۵۰۰
۰/۷۵	۰/۱۷	۱۶۵۲۵۳
۰/۷۵	۰/۱۸	۲۳۹۹۷۶
۰/۷۵	۰/۱۸	۲۶۶۳۵۱

پس از اطمینان از استقلال از مش مدل سازی انجام شده به صحت سنجی با نمونه‌ی مرجع [5] پرداخته شده است. شکل ۲ صحت سنجی انجام شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲- صحت سنجی مدل سازی با مرجع [5]

مشاهده می‌شود که نتایج عددی با اندازه گیری های تجربی دارای انطباق خوبی است، که بیانگر عملکرد قابل قبول مدل محاسباتی به کار رفته در تحقیق حاضر است. پس از اطمینان از صحت مدل سازی و تطبیق آن با مقادیر تجربی، به بررسی تغییرات هندسی کانال جریان می‌پردازیم. در این حالت از یک هندسه‌ی ساده تر با یک کانال در سمت آند و کاتد استفاده شده است. به منظور شبکه‌بندی مدل مورد نظر، از نرم افزار Gambit استفاده شده است. شکل ۳ چگونگی شبکه‌بندی مدل را در این نرم افزار نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمای سه بعدی پیل سوختی مدل شده با استفاده از نرم افزار گمبیت

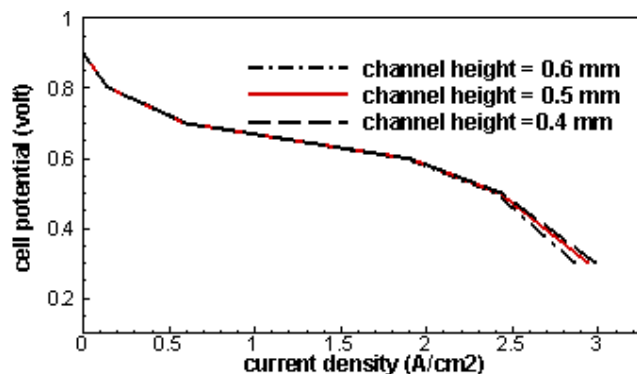
شرایط مرزی انتخاب شده در این نرم افزار نیز به این ترتیب است که ورودی گازها به صورت Mass-flow-inlet ، خروجی گازها Pressure outlet ، تمامی دیواره‌های بالایی، پایینی، تمامی دیواره‌های کناری و جانبی به صورت Wall در نظر گرفته شده‌اند. جدول ۳ مشخصات هندسی پیل سوختی مدل شده را نشان می دهد.

جدول ۳- مشخصات هندسی پیل سوختی مدل سازی شده

اندازه	توضیحات
۱۲۵	طول پیل سوختی (mm)
۰/۶	ارتفاع کانال گاز (mm)
۰/۸	پهنای کانال گاز
۱/۲	ارتفاع جمع کننده ی جریان (mm)
۰/۲۱	ضخامت GDL آند و کاتد (mm)
۰/۰۱۲	ضخامت لایه ی کاتالیست آند کاتد (mm)
۰/۴	ضریب تخلخل کاتالیست کاتد و آند
۰/۰۳۶	ضخامت غشا (mm)
$6 * 10^{-7}$	دبی ورودی در آند ( $kg/m^3$ )
$5 * 10^{-6}$	دبی ورودی در کاتد ( $kg/m^3$ )
۳۵۳	دمای پیل سوختی (K)
۲	فشار ورودی کانال (atm)

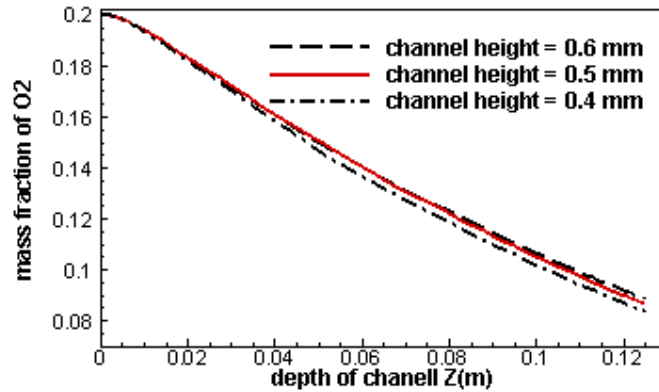
#### ۴- نتایج:

به دلیل نفوذ گازها در لایه ی نفوذ دهنده ی گاز (GDL) و شرکت آن‌ها در واکنش‌های شیمیایی در لایه ی کاتالیست با حرکت به سمت خروجی پیل از مقدار این گازها کاسته می شود. برای افزایش این شدت نفوذ و به دنبال آن افزایش نرخ انجام واکنش های شیمیایی و افزایش دانسیته ی جریان گرفته شده از پیل ارتفاع کانال جریان در سمت آند و کاتد کاهش داده شده است. برای این منظور در سه ارتفاع مختلف ۰/۶، ۰/۵، و ۰/۴ مدل سازی انجام شده و نتایج حاصل از آن در زیر شرح داده می شود. شکل ۴ منحنی پلاریزاسیون پیل را به ازای مقادیر مختلف ارتفاع نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، با کاهش ارتفاع میزان دانسیته ی جریان پیل سوختی افزایش یافته است.



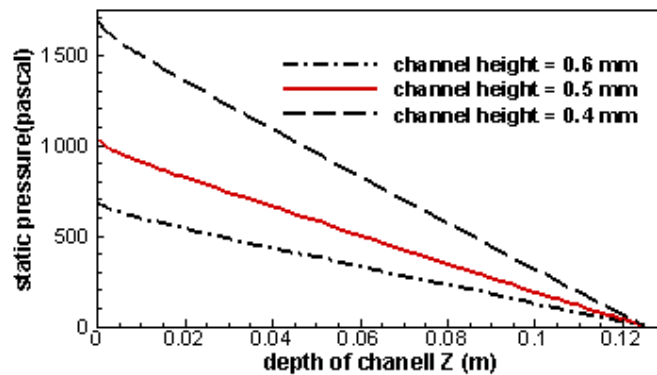
شکل ۴- منحنی پلاریزاسیون پیل سوختی در ارتفاع ۰/۶ - ۰/۵ - ۰/۴

شکل ۵ مقدار کسر جرمی اکسیژن را در محور مرکزی پیل و در طول آن به سمت خروجی نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود با کاهش میزان ارتفاع کسر جرمی اکسیژن در خروجی کاهش یافته و این نشان دهنده افزایش میزان نفوذ این گاز در لایه‌ی نفوذ دهنده است.



شکل ۵- کسر جرمی اکسیژن در محور مرکزی کانال سمت کاتد در ارتفاع ۰/۶ - ۰/۵ - ۰/۴

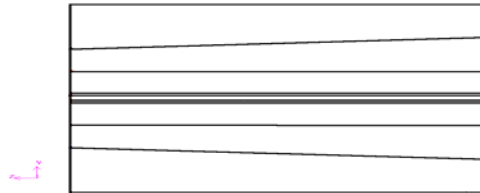
با وجود اینکه میزان دانسیته ی جریان پیل افزایش یافته است، اما یکی از عوامل موثر در میزان کارایی پیل سوختی میزان افت فشار می باشد. چرا که زیاد شدن آن باعث افزایش کار پمپ در پیل سوختی می شود [11]. موتور ها، دهنده ها و پمپ ها از اجزای کلیدی پیل هستند که گازها را در پیل به حرکت در آورده و نیز آب تولید شده را از پیل خارج می کنند. از آنجایی که کار پمپ مصرفی می باشد، باعث کاهش کار مفید سیستم می گردد. بنابراین باید در طراحی بهینه این عامل را هم در نظر بگیریم. شکل ۶ به بررسی میزان افت فشار با تغییر ارتفاع کانال جریان می پردازد. همانطور که مشاهده می شود با کاهش ارتفاع افت فشار در طول پیل سوختی افزایش می یابد، و این یک عامل منفی در این تغییر هندسی می باشد.



شکل ۶- میزان افت فشار در محور مرکزی کانال سمت کاتد و در طول پیل سوختی در ارتفاع ۰/۶ - ۰/۵ - ۰/۴

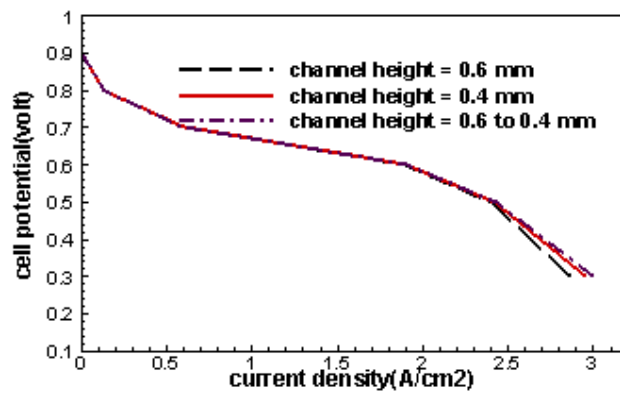
برای برطرف کردن مشکل افت فشار ناشی از کاهش ارتفاع به کاهش تدریجی ارتفاع با یک شیب ثابت در طول پیل سوختی پرداختیم. زیرا هر چه بیشتر به سمت خروجی کانال پیش می رویم از غلظت گازهای واکنش دهنده به دلیل نفوذ آن ها در GDL کم می شود. بنابراین می توان با کاهش تدریجی ارتفاع، به نفوذ بیشتر گازها با کاهش غلظت آنها در طول پیل

سوختی کمک کرد. میزان نفوذ گازها را در ناحیه ی واکنش افزایش دهیم. شکل ۷ نمای دو بعدی کاهش ارتفاع کانال را در طول پیل سوختی نشان می دهد.



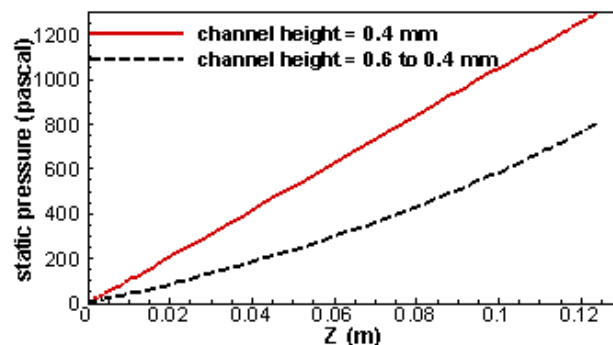
شکل ۷- نمای دو بعدی کاهش ارتفاع کانال جریان در طول پیل سوختی

شکل ۸ به مقایسه ی منحنی پولاریزاسیون به ازای تغییر ارتفاع از ۰/۶ به ۰/۴ میلیمتر در طول پیل سوختی و تغییر شیب دار آن از ۰/۶ به ۰/۴ میلیمتر می پردازد. همانطور که از نمودار مشاهده می شود میزان افزایش دانسیته ی جریان تقریباً مساوی و حتی برای حالت شیب دار تا حدی بیشتر است.



شکل ۸- منحنی پولاریزاسیون در ارتفاع ۰/۶-۰/۴ - کاهش ارتفاع با شیب ثابت از ۰/۶ به ۰/۴

شکل ۹ نیز به مقایسه ی میزان افت فشار در حالت تغییر شیب دار ارتفاع و کاهش یکسان آن در طول پیل سوختی می پردازد. همانطور که مشاهده می شود، میزان افت فشار در حالت شیب دار کمتر می باشد. بنابراین این تغییر هندسی را می توان مطلوب در نظر گرفت.



شکل ۹- افت فشار در محور مرکزی کانال کاتد در ارتفاع ۰/۴ - کاهش ارتفاع با شیب ثابت از ۰/۶ به ۰/۴



## ۵- نتیجه گیری کلی:

در این مقاله به مدل سازی سه بعدی و تک فاز پیل سوختی PEM پرداخته شده است. هدف اصلی بررسی پارامترهای ابعادی کانال جریان در عملکرد پیل سوختی و دانسیته‌ی جریان گرفته شده از آن بوده است. در ابتدا برای افزایش نفوذ گازهای واکنش دهنده به لایه نفوذ دهنده‌ی گاز و افزایش نرخ واکنش‌های شیمیایی ارتفاع کانال کاهش داده شد. مدل سازی برای سه ارتفاع متفاوت ۰/۶، ۰/۵ و ۰/۴ انجام شده و نشان دادیم که با کاهش ارتفاع کانال نفوذ گازها به ناحیه‌ی واکنش افزایش یافته و در نتیجه دانسیته‌ی جریان گرفته شده از پیل افزایش خواهد یافت. اما متأسفانه افت فشار در طول پیل با کاهش ارتفاع زیاد شده و این یک عامل منفی است. زیرا کار مصرفی دهنده‌ها یا پمپ‌های انتقال دهنده‌ی جریان به کانال افزایش می‌یابد. برای از بین بردن این اثر منفی میزان ارتفاع به صورت تدریجی با یک شیب ثابت کاهش دادیم. زیرا در ورودی کانال غلظت گازها مطلوب بوده و با حرکت به سمت خروجی میزان غلظت آنها به دلیل مصرف و نفوذ در ناحیه‌ی واکنش کاهش می‌یابد. پس با کاهش ارتفاع در طول پیل سوختی می‌توان به نفوذ بیشتر آن‌ها کمک کرد. همانطور که مشاهده شد میزان افزایش دانسیته‌ی جریان با کاهش ارتفاع به صورت شیب دار از ۰/۶ به ۰/۴ بیشتر از مقدار ارتفاع ۰/۴ برای کانال بوده و این در حالی است که افت فشار در این حالت بسیار کمتر از کانال با ارتفاع ۰/۴ است.

## مراجع:

1. Barbir, F., "PEM Fuel cells Theory and Practice", ELSEVIER, 2005
2. Larminie, J., and Dicks, A., Fuel cell system Explained, John Wiley, New York, 2000
3. Bernardi, D.M., Verbrugge, M.W., "mathematical model of the solid-polymer-electrolyte fuel cell", J electrochem Soc, 1992
4. He, W., Yi, J.S., Nguyen, T.V., "Two-phase flow model of the cathode of PEM fuel cells using interdigitated flow fields", J AIChE, 2000
5. Sukkee, U.m., and Wang, C.Y., "A three-dimensional analysis and transport and electrochemical reaction in polymer electrolyte fuel cell", J Power Source, 2003
6. Jeon, S., Greenway, S., Shimpalee, and Van Zee, J.W., "The effect of serpentine flow-field designs on PEM fuel cell", Int J Hydrogen energy, 2008
7. Wang, L., Liu, H., "Separate measurement of current density under the channel and the shoulder in PEM fuel cells", J Power Sources, 2008
8. Zhou, T., Liu, H., "A general three-dimensional model for proton exchange membrane fuel cells", J Powe Sources, 2001
9. Higier, A., and Liu, H., "Optimization of PEM fuel cell flow field via local current density measurement", Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Miami, 2009
10. Mishra, B., Junxiao, W.u., "Study of the effects of various parameters on the transient current density of polymer membrane fuel cell start-up", J Power Source, 2009
11. Wang, X.D., Mon, W., Weng, F.B., "Numerical study on channel size effect for proton exchange membrane fuel cell with serpentine flow field", J E conman, 2009